

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311135

一种永置式石油生产地面多井组单井轮巡 三相流监测装置及应用研究^{*}

郝 虎¹, 陈晓玉^{1,2}, 孔德明³, 孔德瀚⁴, 孔令富^{1,2}

(1. 燕山大学信息科学与工程学院 秦皇岛 066004; 2. 燕山大学河北省计算机虚拟技术与系统集成重点实验室
秦皇岛 066004; 3. 燕山大学电气工程学院 秦皇岛 066004; 4. 河北环境工程学院信息工程系 秦皇岛 066000)

摘 要:为了解决传统石油开发集中计量方式难以获取单口油井油气水三相流相关参数的难题,采用流体体积和有限元分析等方法在建立该测量装置的数值仿真模型基础上对其结构参数、气液分离效果等进行了深入研究与优化,从而确定了该监测装置的最优结构参数,并研制了可以在现有集中计量环境中长期、稳定与可靠使用的一种永置式石油生产多井组单井轮巡三相流监测装置。另外,还在搭建的永置式石油生产地面多井组单井轮巡三相流多参数监测平台上开展了实验研究,实验结果表明,所研制的装置在气、液相流量 $5\sim 70\text{ m}^3/\text{d}$ 、液相持水率 $50\%\sim 90\%$ 等混合流体下持水率、气量测量误差均小于 10% , 流量测量误差小于 4% 。仿真和实验均证明了永置式监测装置具有良好的多分相测量性能。

关键词: 永置式; 气液分离; 监测装置; 多参数; 优化设计

中图分类号: TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on the use of a permanent multi-well group single-well patrol three-phase flow multi-parameter measuring device for oil production

Hao Hu¹, Chen Xiaoyu^{1,2}, Kong Deming³, Kong Dehan⁴, Kong Lingfu^{1,2}

(1. Institute of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

2. Hebei Key Laboratory of Computer Virtual Technology and System Integration, Yanshan University, Qinhuangdao
066004, China; 3. Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

4. Department of Information Engineering, Hebei University of Environmental Engineering, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: The traditional centralized metering method for oil development is difficult to get the parameters linked to the oil-gas-water three-phase flow in a single oil well. To address this issue, the volume of fluid and finite element analysis are used in this study to optimize the structural parameters and impacts of the gas-liquid separation on the basis of the numerical simulation model of the measuring device. Therefore, the optimal structural parameters of the monitoring device are determined. Based on the afore-mentioned research, a permanent multi-well group single-well patrol three-phase flow multi-parameter measuring device is developed for long-term, stable and reliable utilization in the existing centralized metering environment. In addition, the experimental studies are conducted on a permanent multi-well group single-well patrol three-phase flow multi-parameter measuring platform built for oil production. The experimental results show that the developed device has less than 10% error in water holdup and gas holdup measurement and less than 4% error in flow rate measurement under mixed fluids such as gas and liquid phase flow rate range ($5\sim 70\text{ m}^3/\text{d}$) and liquid phase water holdup range ($50\%\sim 90\%$). Both simulations and experiments demonstrate that measuring device performs well in water holdup measurement.

Keywords: permanent type; gas-liquid separation; measuring device; multi-parameter; optimized design

收稿日期: 2023-03-05 Received Date: 2023-03-05

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(62173289)、河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2020118)、河北省教育厅在读研究生创新能力培养项目(CXZZBS2023063)资助

0 引言

随着我国大部分油田已进入了开发的中后期,油井产液剖面采出液含水量逐渐增加,同时还伴有溶解气析出。现阶段一些中老油田油井剖面产出液多为油气水三相流^[1]。而在生产测井中流体参数是表征油井动态变化和评价油层生产状况的重要参数,可以有效地用来预测油井注入产出、油井剩余储量分布等一些重要生产信息^[2]。长期以来,油井井下测试是获取井下产能信息的主要途径之一^[3],但无法做到永置使用。而目前地面油田生产区域都是将多井产出液汇聚至计量站开展集中计量,这种集中计量方式还不能随时获取到单口油井三相流体各相含率、流量等井况重要的动态生产信息,更难以解读每口油井的实际生产状况。随着油田生产进入中后期,石油开采对地面单井永置式动态测试需求将越来越大,地面单井生产动态信息往往又是决定油田高产、稳产的重要因素^[4-5]。永置式地面三相流监测装置主要针对石油生产区域油井的现场测试,可用于油井的生产测井任务,适用于不停产测井,能够通过长期连续监测、记录油井多参数信息数据,及时详细了解油井的生产动态。目前,关于地面油井三相流测试装置的研制引起了国内外学者的广泛关注。对此,AGAR公司研制的MPFM-400型^[6-7]、ACCUFLOW公司研制的MPFM型^[8-9]及TEXACO公司研制的SMS型^[10-11]多相流测量装置均能够实现气液分离;叶卫东等^[12]研制了一种重力式气液分离器并成功实现了气液分离;Olaleye等^[13]研制了一种立式气液分离器并实现了不同气液两相流工况下的气液分离。但是,上述气液分离器均存在着故障率高、寿命短、维护复杂、集成度差及体积庞大等弊端。因此,本文开展的地面多井组单井轮巡测试是当前石油生产测井领域亟需的课题。鉴于装备研制的限制,目前国内外尚没有可供长期、稳定、可靠使用的单井多相流固定在线测试的装备^[14-15]。

本文基于气液分离^[16-17]、气相计量^[18-19]、电导持水率^[20-21]及相关流量测量^[22]等技术,创造性地研制一种可以长期在现场使用且能连续可靠工作的接地气、易推广、无渗漏、高性价比的永置式石油生产地面多井组单井轮巡三相流多参数监测装置(permanent multi-well group single-well patrol three-phase flow multi-parameter measuring device for oil production, PMGSPTFMMD_OP),此装置既可分时轮巡全面测量又能分别测出每口油井产出液各相含率等参数,且能精准地在计量站内永置运行。决定此装置研制成功的关键在于具有多种精准传感功能的核心检测部件(core detection parts, CDP),此部件采用聚醚醚酮(poly ether ether ketone, PEEK)新型材料把凝聚着课

题组智慧的多项发明专利注塑在一个高强度、无渗漏的管件中。注塑管件的这种无泄漏、高强度、可靠性、稳定性决定了本文所研制装置的先进性与可长期使用的耐久性。另外,还采用流体体积(volume of fluid method, VOFM)和有限元分析方法(finite element method, FEM)对装置的结构设计、参数及气液分离效果等问题进行了研究与优化设计。

1 PMGSPTFMMD_OP 组成结构及原理

1.1 PMGSPTFMMD_OP 组成结构

研制的永置式石油生产地面多井组单井轮巡口多参数监测装置结构及实物如图1、2所示。装置主要包括主管道,电磁阀1、2、3,液位计1、2,排气阀,气液分离罐及CDP等。CDP由下至上包括电导式持水率与流量两种传感器,电导式流量传感器由激励电极环 FE_1 和 FE_2 、测量电极环 $FM_1 \sim FM_4$ 组成;电导式持水率传感器主要包括激励电极环 WE_1 和 WE_2 、测量电极环 $WM_1 \sim WM_4$;CDP采用不锈钢(IRON)材料制作而成并嵌入到PEEK绝缘管中。

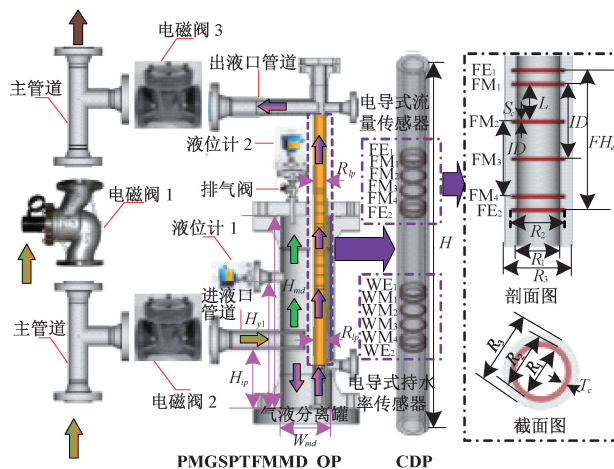


图1 PMGSPTFMMD_OP 组成结构示意图

Fig. 1 Composition structure diagram of PMGSPTFMMD_OP

将PMGSPTFMMD_OP与送往计量站内不同油井的输送管道采用轮巡切换的方式对每口油井产出液参数进行分时测量。以实现地面每口单井三相流多参数的测试功能。

该永置式石油生产地面多井组单井轮巡多参数监测装置具备如下永置式测试特点。

1) 工作周期长,可在计量站内连续工作半年以上,实时监测油井生产动态信息。

2) 应用范围广,既可分时轮巡全面测量又能分别测出每口油井产出液各相含率等参数。



图2 PMGSPTFMMD_OP 实物

Fig. 2 Photo of PMGSPTFMMD_OP

3) 总体费用低,不需要现场长期施工,降低了人工成本,提高了测试效率。

4) 智能化水平高,可实时监测油井动态生产信息,不需要认为干预。

与常规装置相比,该技术不用通过复杂的测试工艺,也不用关井测试。结构、测井技术简单,满足了石油生产区域长期、稳定、可靠使用的工作要求。本文研制的用于传统计量站中实现多井组轮巡测试单井三相流装置实际应用如图3所示。

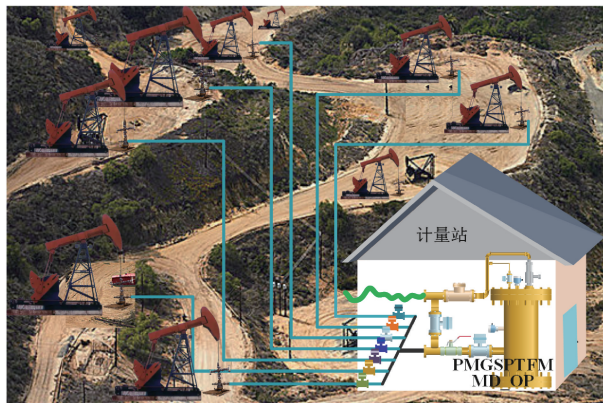


图3 地面多井组单井轮巡计量示意图

Fig. 3 Diagram of single well metering with multi-well centralized patrol on the surface

1.2 PMGSPTFMMD_OP 测量原理

装置开展测量工作时,油井产出液从进液口进入PMGSPTFMMD_OP中,流体在重力及冲击振荡作用下实现气液分离。位于气液分离罐内室上端的液位计1、2可对气量进行测量;分离罐中混合液体受压力作用使其进入测量通道,由设置在此的电导式持水率传感器和流量传感器进行持水率及流量测量。

1) 气量测量

气液分离过程中,在气-液界面累积的最初时刻,液位计1、2均输出低电平,排气阀处于关闭状态;当气-液界面累积到液位计1、2之间时,液位计1仍输出为低电平,但液位计2已输出为高电平,此时排气阀仍处于关闭状态;当气-液界面位于下端液位计1时,液位计1、2均输出高电平,此时排气阀处于开启状态,将累积的已测完气体排放到下游输出管道中。控制排气阀工作的液位计输出状态满足式(1)。

$$s(t)_i = \begin{cases} 1, & \text{液位计}(x, y, z) \text{ 处为气相} \\ 0, & \text{液位计}(x, y, z) \text{ 处为液相} \end{cases} \quad (1)$$

测气工作周期的排气时间可以表示为:

$$t = \frac{\sum_{i=0}^n (s(t)_1 == 1, s(t)_2 == 1, i++)}{F_{kz}} \quad (2)$$

式中: F_{kz} 为液位计1、2的采样频率; i 为其采样点数。

结合排气时间、气液分离罐内室直径及液位计1、2的高度差等可以获取气相流量:

$$Q = \pi \left(\frac{W_{md}}{2} \right)^2 \times (H_{md} - H_{y1}) \times t \quad (3)$$

式中: W_{md} 、 H_{md} 为PMGSPTFMMD_OP气液分离罐内室的宽度和高度; H_{y1} 为液位计1的高度。

排气阀由开启状态转变为关闭状态时,监测装置又从最初积累气体开始了下一个新的气相计量周期。依据气体周期测量结果并综合流体的流量、密度、压力等参数进而求得三相流体持气率。

2) 持水率测量

如图1所示,PMGSPTFMMD_OP开始测量工作时,主管道电磁阀1关闭,涉及测量工作的电磁阀2和3开启。当多相流流经测量管道,此时电导式持水率传感器开始采集数据。由于激励电极环 WE_1 与压控恒流源相连接,激励电极环 WE_2 接地。当持水率发生变化时,油气水混合电导率也会发生变化,所以测量电极环 $WM_{1,3}$ 输出电压也随之变化。可表示为:

$$V_m = K_{\sigma} \times \sigma_m^{-1} \times I_e = K_{\sigma} \times \left[\frac{(3 - Y_{dw})}{2Y_{dw}\sigma_w} \right] \times I_e \quad (4)$$

式中: K_{σ} 为校正系数; I_e 为施加在 WE_1 上的激励电流; σ_m 为电导式持水率传感器测量区域混合流体的电导率; σ_w 为水相电导率; Y_{dw} 为持水率测量结果。

当管道内充满油气水混合流体时,持水率 Y_{dw} 与测量电极环 $WM_{1,3}$ 输出电压的关系为:

$$Y_{dw} = \frac{3V_w}{2V_m + V_w} \quad (5)$$

由此可通过混合流体中测量电极环 $WM_{1,3}$ 的电压 V_m 与纯水相测量电极环 $WM_{1,3}$ 的电压 V_w 确定油气水三相流持水率。

3) 液相流量测量

当液相混合流体流经测量管道时,电导式流量测量传感器开始采集数据。由于激励电极环 FE_1 与压控恒流源相连接,激励电极环 FE_2 接地。上游测量电极环 FM_2 、 FM_4 和下游测量电极环 FM_1 、 FM_3 获得上下游输出信号 $x(t)$ 、 $y(t+\tau)$,由于上下游检测信号具有相关性。因此,可对信号 $x(t)$ 、 $y(t+\tau)$ 做互相关运算,互相关函数 $R_{xy}(\tau)$ 可表示为:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau) dt \quad (6)$$

式中: T 为积分时间。对上下游信号做互相关运算获取流体从上游测量电极环 FM_2 、 FM_4 到下游测量电极环 FM_1 、 FM_3 的渡越时间 τ_0 。进而求出相关流速 U_{cc} 为:

$$U_{cc} = L/\tau_0 \quad (7)$$

式中: L 为下游测量电极环 FM_1 、 FM_3 和上游测量电极环 FM_2 、 FM_4 的间距。

进而得到液相流量 Q 为:

$$Q = \pi \times \left(\frac{R_1}{2}\right)^2 \times U_{cc} \times t \quad (8)$$

式中: R_1 为 CDP 内径。

2 PMGSPTFMMD_OP 结构参数优化研究

2.1 PMGSPTFMMD_OP 仿真模型

为优化 PMGSPTFMMD_OP 结构参数,本文对图 2 所示的 PMGSPTFMMD_OP 组成结构及参数利用流体体积和有限元分析方法建立了仿真模型如图 4 所示。图 4 中结构参数与图 2 中的各参数是相互一一对应的。

本文通过求解流体各相含率的连续方程来跟踪不同分散相之间的界面变化进而获取气液分离过程中流体各相含率的变化情况。针对第 q 相,建立守恒方程^[23]可表示为:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q v_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (9)$$

式中: ρ_q 为第 q 相的密度; α_q 为第 q 相体积分数; S_{α_q} 为第 q 相在单元中所占的面积; $\dot{m}_{pq}$ 为第 p 相到第 q 相的质量输送; $\dot{m}_{qp}$ 为第 q 相到第 p 相的质量输送; v_q 为第 q 相流体的速度。

其约束条件可表示为:

$$\begin{cases} Inlet = V_{in} \\ H_g + H_l = 1H_g, H_l \in [0, 1] \\ outlet = P_{out} \end{cases} \quad (10)$$

式中: H_g 、 H_l 分别表示气、液相含率; V_{in} 为混合流体的流速; P_{out} 为出液口处的压力。

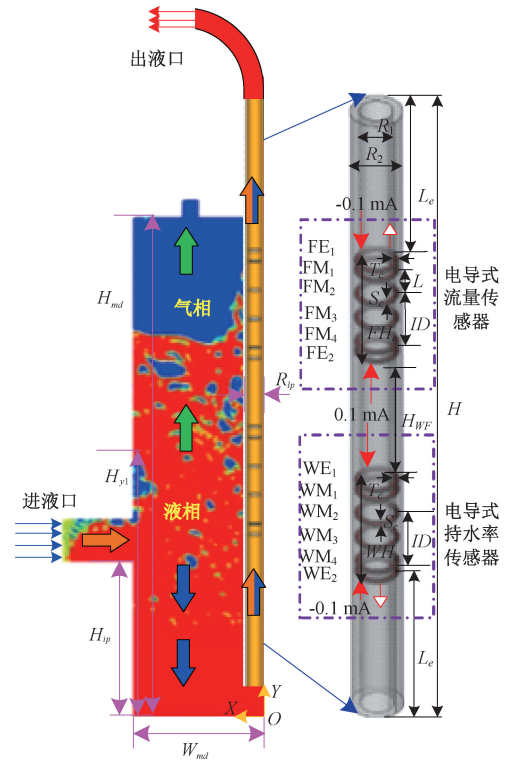


图4 PMGSPTFMMD_OP 仿真模型

Fig. 4 The simulation model of PMGSPTFMMD_OP

电导式持水率传感器测量管内电极环 $WM_{1,3}$ 与流量传感器测量管内电极环 FM_{1-4} 间的电势 u 均可用二维坐标系 (r, z) 下的 Laplace 方程^[24]表示:

$$\nabla^2 u(r, z) = \frac{\partial^2 u(r, z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 u(r, z)}{\partial z^2} = 0 \quad (11)$$

其边界条件可以表示为:

$$\begin{cases} u=0 (0 \leq z \leq L_e, L_e+S_c \leq z \leq L_e+WH_e-S_c, \\ L_e+S_c \leq z \leq L_e+WH_e+H_{WF}, r=\frac{R_1}{2}, \\ L_e+WH_e+H_{WF}+S_c \leq z \leq L_e+WH_e+H_{WF}+FH_e-S_c, \\ L_e+WH_e+H_{WF}+FH_e+S_c \leq z \leq 2L_e+WH_e+H_{WF}) \\ \frac{\partial u}{\partial z} = 0 (z=0, z=H); \\ \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{I_e}{S_R} \left(r=\frac{R_1}{2}, L_e+WH_e-S_c \leq z \leq L_e+WH_e, \right. \\ L_e+WH_e+H_{WF}-S_c \leq z \leq L_e+WH_e+H_{WF}+FH_e, \\ L_e+WH_e+H_{WF} \leq z \leq L_e+WH_e+H_{WF}+S_c+FH_e, \\ L_e+WH_e+H_{WF} \leq z \leq L_e+WH_e+H_{WF}+S_c, \\ \left. L_e \leq z \leq L_e+S_c \right) \end{cases} \quad (12)$$

式中: u 为 CDP 内部电势分布; I_e 为施加到 CDP 激励电极的直流恒流电流; S_R 是 CDP 激励电极的表面积。

在考虑优化设计结果具有普遍代表性的情况下,式(9)~(12)中所涉及的参数如下:进液口流速为0.22 m/s,混合流体持气率为40%,出液口压力为0.1 MPa,电极FE₄、WE₁输入的直流电流为0.1 mA,电极FE₁、WE₄接地。PMGSPTFMMD_OP仿真模型中除上述做出参数说明外的其他参数表示的量值参考文献[25-26]。

2.2 PMGSPTFMMD_OP 参数优化

PMGSPTFMMD_OP 结构参数的设计直接影响其测量效果。因此,本文对PMGSPTFMMD_OP的气液分离罐内室宽度 W_{md} 、高度 H_{md} 、进液口位置 H_{ip} 、液流管内径 R_p 、液位计1位置 H_{y1} 及FM_{1,3}~FM_{2,4}电极间距 L 等参数进行优化研究。参数优化研究涉及的各项度量性能指标如下。

液流管内携气量 K_y 指标如下:

$$K_y = \frac{4}{\pi R_1^2} \int_0^{R_1} \int_0^{2\pi} \alpha(\theta, r, z) r d\theta dr \quad (13)$$

式中: $\alpha(\theta, r, z)$ 为液位管位置 (θ, r, z) 处的携气量; R_1 为液流管内径。

分离罐中气液分离效率 η 可表示为:

$$\eta = \left(1 - \frac{K_y}{K_i}\right) \times 100\% \quad (14)$$

式中: K_y 表示液流管内携气量; K_i 表示进液口气量。

进出液口压力降 ΔP_g 可表示为:

$$\Delta P_g = P_i - P_y \quad (15)$$

式中: P_i 和 P_y 分别表示进液口和出液口压力值。

电导式流量传感器的相对灵敏度 S_{avg} 为:

$$S_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \left(\frac{\Delta V_m(x, y, z)}{[\Delta V_m(x, y, z)]_{\max}} \times 100\% \right) \quad (16)$$

式中: $[\Delta V_m(x, y, z)]_{\max}$ 为设定范围内油气粒子遍历所有位置获取的输出电压差 $\Delta V_m(x, y, z)$ 的最大值; N 为测量区域内单元体积总数。

电导式流量传感器的均匀性误差 S_{sp} 为:

$$S_{sp} = \frac{\left(\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N (\psi_m(x, y, z) - S_{avg})^2 \right)^{1/2}}{S_{avg}} \quad (17)$$

$m = 1, 2, \dots, N$

式中: $\psi_m(x, y, z)$ 为位置 (x, y, z) 处的灵敏度。

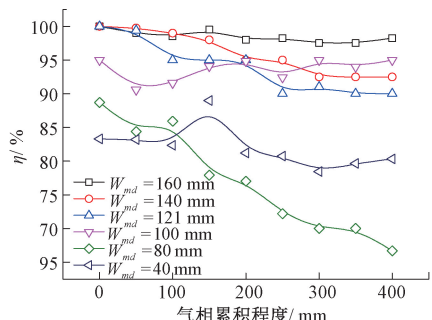
电导式流量传感器的有效信息比 C_F 为:

$$C_F = \frac{\int_v \frac{\Delta V_m(x, y, z)}{[\Delta V_m(x, y, z)]_{\max}} dv}{\int_{v'} \frac{\Delta V_m(x, y, z)}{[\Delta V_m(x, y, z)]_{\max}} dv} \times 100\% \quad (18)$$

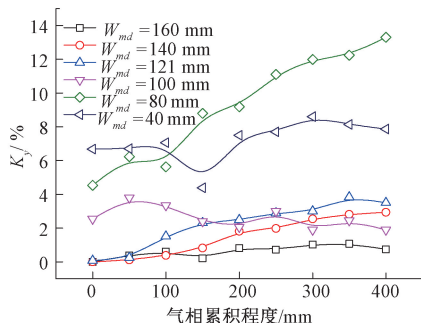
式中: v 为单位体积; v' 为测量区域的空间体积。有效信息比就是用于表征获取有用信息的性能。

1) 宽度优化分析

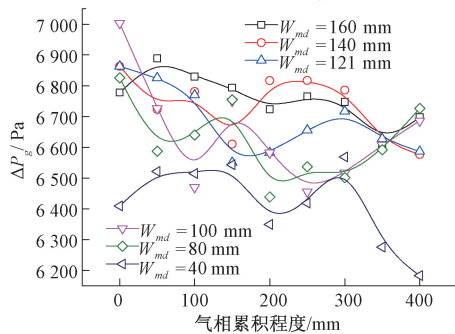
宽度 W_{md} 系指气液分离罐内室直径的大小,其作用就是通过影响介质冲击振荡及沉降的径向空间进而决定了PMGSPTFMMD_OP的气液分离性能,本文考虑了PEEK注塑水平及监测装置小型化要求。获取 $W_{md} \in [40 \text{ mm}, 160 \text{ mm}]$ 范围内的优化结果, W_{md} 与分离罐中气液分离效率 η 、液流管内携气量 K_y 和进出液口压力降 ΔP_g 的关系曲线如图5所示。



(a) η 随 W_{md} 变化曲线
(a) Variation curve of η with W_{md}



(b) K_y 随 W_{md} 变化曲线
(b) Variation curve of K_y with W_{md}



(c) ΔP_g 随 W_{md} 变化曲线
(c) Variation curve of ΔP_g with W_{md}

图5 PMGSPTFMMD_OP 宽度优化结果

Fig. 5 The width optimization of PMGSPTFMMD_OP

由图5(a)~(c)可知,随着宽度 W_{md} 增加,分离罐中气液分离效率 η 、进出液口压力降 ΔP_g 呈现逐渐增大的趋势,而液流管内携气量 K_y 逐渐减小。同时,随着气相的逐渐累积,分离罐中气液分离效率 η 、进出液口压力降

ΔP_g 逐渐降低,液流管内携气量 K_y 逐渐增加。因此,宽度 W_{md} 越大其分离效率 η 越高,液流管内携气量 K_y 越小、进出口压力降 ΔP_g 越大,越有利于气液分离。通过综合考虑 PMGSPTFMMD_OP 的实际加工、现场安装等问题,最终确定传感器宽度 $W_{md} = 160 \text{ mm}$ 。

2) 高度优化分析

高度 H_{md} 决定了介质冲击振荡及重力沉降的轴向空间,而轴向空间的大小对 PMGSPTFMMD_OP 气液分离性能具有重要影响。本文考虑了 PEEK 注塑水平及装置小型化要求。将获取 $H_{md} \in [500 \text{ mm}, 800 \text{ mm}]$ 范围内的优化结果, H_{md} 与分离罐中气液分离效率 η 、液流管内携气量 K_y 和进出口压力降 ΔP_g 的关系曲线如图 6 所示。

由图 6(a)~(c) 可知,随着高度 H_{md} 的增加,分离罐

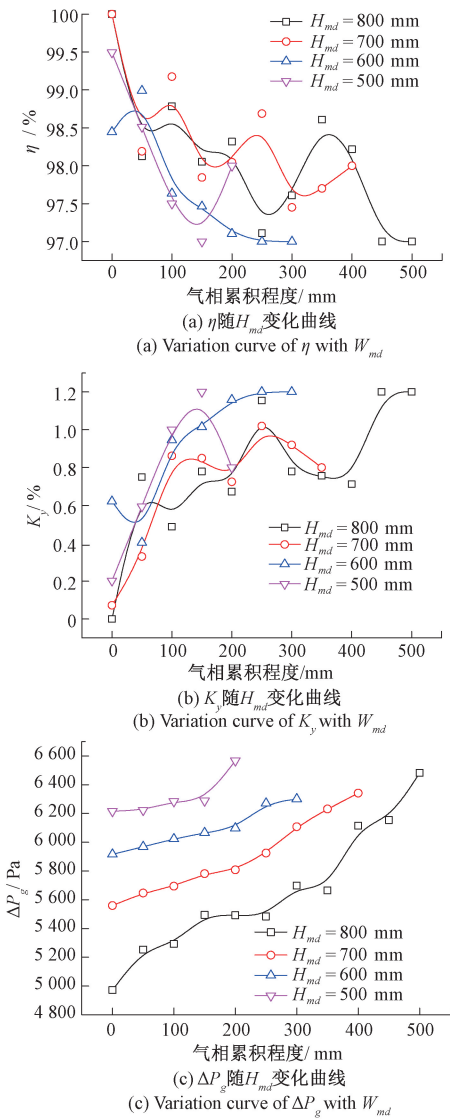


图 6 PMGSPTFMMD_OP 高度优化结果
Fig. 6 The height optimization of PMGSPTFMMD_OP

中气液分离效率 η 逐渐升高,进出口压力降 ΔP_g 、液流管内携气量 K_y 逐渐降低。同时,随着气相逐渐累积,其气液分离效率 η 呈现下降趋势,液流管内携气量 K_y 和进出口压力降 ΔP_g 均呈现上升趋势。因此,高度 H_{md} 值越大,其气液分离效率 η 越大,进出口压力降 ΔP_g 、液流管内携气量 K_y 越低,越有利于提高其气液分离性能。综合考虑 PMGSPTFMMD_OP 的实际加工、现场安装等问题,最终确定装置高度 $H_{md} = 700 \text{ mm}$ 。

3) 进液口位置优化分析

进液口管道位置 H_{ip} 影响监测装置内气相的流动方向及气液分离空间,同时本文考虑了 PEEK 注塑水平及装置小型化要求。将获取 $H_{ip} \in [121 \text{ mm}, 521 \text{ mm}]$ 范围内的优化结果,进液口管道位置 H_{ip} 与分离罐中气液分离效率 η 、液流管内携气量 K_y 和进出口压力降 ΔP_g 的关系曲线如图 7 所示。

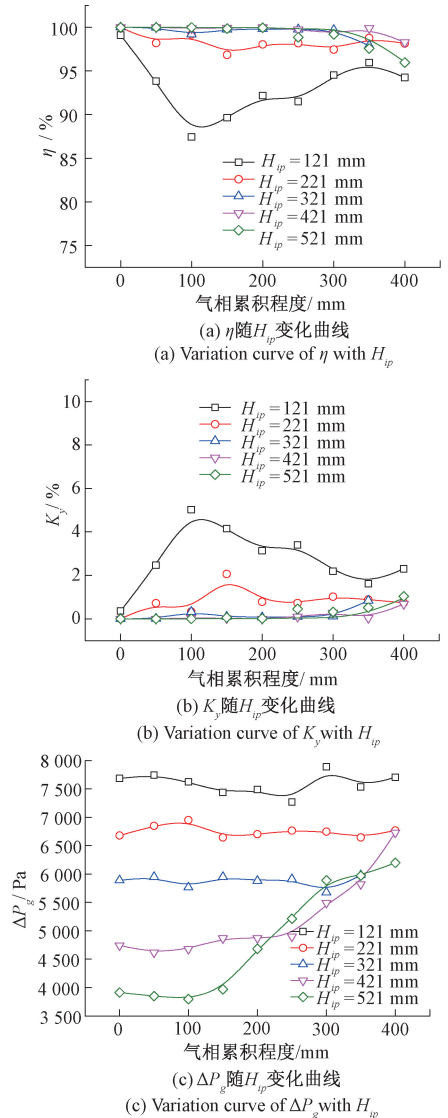


图 7 PMGSPTFMMD_OP 进液口管道位置优化结果
Fig. 7 Inlet pipe location optimization of PMGSPTFMMD_OP

由图 7(a)~(c) 可知,当进液口管道位置 H_{ip} 由 121 mm 升高至 221 mm 时,分离罐中气液分离效率 η 逐渐增大,进出液口压力降 ΔP_g 、液流管内携气量 K_y 逐渐减小;当进液口管道位置 H_{ip} 由 321 mm 升高至 521 mm 时,其气液分离效率 η 、液流管内携气量 K_y 分别在 99% 和 0.5% 上下波动,进出液口压力降 ΔP_g 逐渐减小。随着气相的逐渐累积,气液分离效率 η 、液流管内携气量 K_y 基本不受其影响,而进出液口压力降 ΔP_g 呈现波动上升的趋势;因此,当进液口管道位置 $H_{ip} = 321$ mm,其气液分离效率 η 最大,液流管内携气量最低,进出液口压力降 $\Delta P_g = 6\ 000$ Pa,此时更有利于气液分离。因此,最终选定进液口管道位置 $H_{ip} = 321$ mm。

4) 液流管内径优化分析

液流管内径 R_{lp} 只影响装置内的压力变化。本文考虑了 PEEK 注塑水平及监测装置小型化要求。将获取 $R_{lp} \in [15\text{ mm}, 35\text{ mm}]$ 范围内的优化结果,液流管内径 R_{lp} 与进出液口压力降 ΔP_g 的关系曲线如图 8 所示。

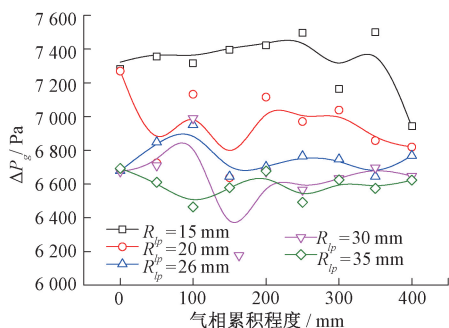


图 8 PMGSPTFMMD_OP 液流管内径优化结果

Fig. 8 Liquid flow pipe inner diameter optimization design results of PMGSPTFMMD_OP

由图 8 可知,PMGSPTFMMD_OP 进出液口压力降 ΔP_g 随着 R_{lp} 的减小逐渐增大。同时,随着气相的逐渐累积,进出液口压力降 ΔP_g 呈现波动变化并趋于稳定。因此,液流管内径越小则装置的压力降越大,考虑到装置的实际加工、现场安装等问题,本文选定液流管内径 $R_{lp} = 26$ mm,这样也能保证装置的测量安全性。

5) 液位计位置优化分析

液位计 2 安装在 PMGSPTFMMD_OP 的气液分离罐内室顶部。而液位计 1 位置 H_{y1} 决定了气体计量周期以及气液分离空间的大小,本文考虑了 PEEK 注塑水平及监测装置小型化要求。将获取 $H_{y1} \in [300\text{ mm}, 700\text{ mm}]$ 范围内的优化结果,液位计 1 位置 H_{y1} 与分离罐中气液分离效率 η 、液流管内携气量 K_y 和进出液口压力降 ΔP_g 的关系曲线如图 9 所示。

由图 9(a)~(c) 可知,随着液位计 1 位置 H_{y1} 逐渐增大,分离罐中气液分离效率 η 逐渐增大,液流管内携气量

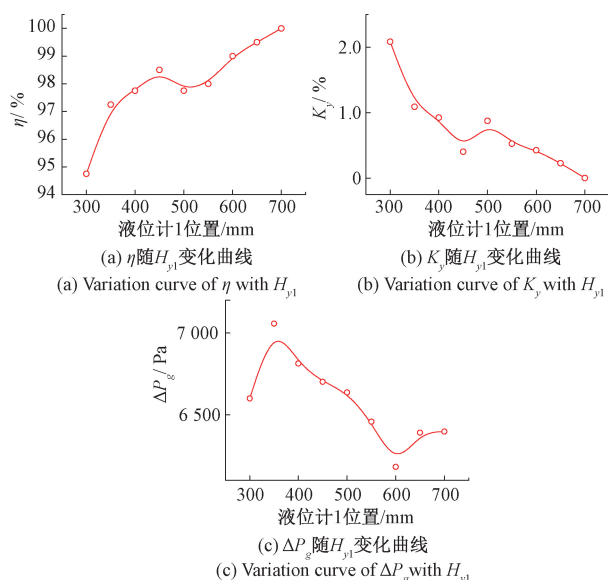


图 9 PMGSPTFMMD_OP 液位计位置优化结果

Fig. 9 Liquid level gauge position optimization design results of PMGSPTFMMD_OP

K_y 逐渐降低,进出液口压力降 ΔP_g 逐渐降低。因此,液位计 1 的安装位置越接近气液分离罐内室顶部越有利于气液分离。综合考虑 PMGSPTFMMD_OP 的实际加工、现场安装、排气周期等问题,本文选定 $H_{y1} = 400$ mm。

6) 相关测速电极间距

$FM_{1,3} \sim FM_{2,4}$ 电极间距 L 决定了电导式流量传感器的灵敏度分布以及输出信号的相关性,它将影响流量测量精度。本文在郝虎等^[27]研究成果的基础上,同时考虑到 PEEK 注塑水平及监测装置小型化要求,开展参数 L 优化设计研究。获取 $L \in [4\text{ mm}, 22\text{ mm}]$ 范围内电极间距优化结果如图 10 所示。

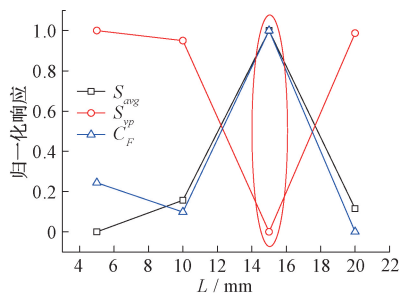


图 10 $FM_{1,3} \sim FM_{2,4}$ 电极间距 L 参数优化结果

Fig. 10 Parameter optimization results of the $FM_{1,3} \sim FM_{2,4}$ electrode distances L

由图 10 可知,当 $L = 15$ mm 时, S_{sp} 值最小, S_{avg} 、 C_F 值最大。因此,本文最终确定 $L = 15$ mm。

综上所述,本文最终确定图 2 中 $H_{md} = 700$ mm、 $W_{md} = 160$ mm、 $H_{ip} = 321$ mm、 $R_{lp} = 26$ mm、 $H_{y1} = 400$ mm、 $L = 15$ mm。

3 PMGSPTFMMD_OP 性能分析

3.1 PMGSPTFMMD_OP 气液分离过程

在上述参数优化结果基础上,本文对 PMGSPTFMMD_OP 气液分离过程进行仿真分析,气液分离结果如图 11 所示。

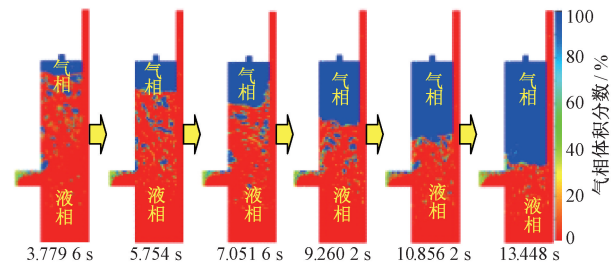


图 11 POPSMWCPSWMPD_MD 内气液分离结果
Fig. 11 Gas-liquid separation results within PMGSPTFMMD_OP

由图 11 可知,密度较小的气体聚集在 PMGSPTFMMD_OP 上部最后由可控排气阀进行排出,密度较大的液体进入液流管传输。同时,PMGSPTFMMD_OP 上部基本没有液体存在,而液流管中的液体携气量很低可以忽略不计。因此,采用上述优化后的 PMGSPTFMMD_OP 能较好实现气液分离。

3.2 PMGSPTFMMD_OP 压力分布

进一步获取 PMGSPTFMMD_OP 气液分离过程中压力变化结果,如图 12 所示。

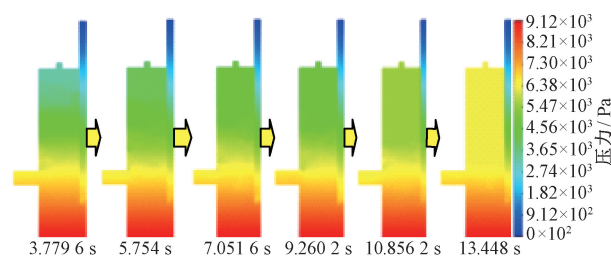


图 12 PMGSPTFMMD_OP 内压力变化云图
Fig. 12 Cloud map of pressure change within PMGSPTFMMD_OP

由图 12 可知,气量对 PMGSPTFMMD_OP 内的压力变化具有重要影响。随着 PMGSPTFMMD_OP 上部气相逐渐累积,气液分离罐内压力逐渐增加,而液流管内压力基本不受影响,且最大压力不超过 9 120 Pa。因此,在气液分离过程中,其压力变化在安全范围内。

3.3 PMGSPTFMMD_OP 内速度场分析

流速变化对于流体之间的冲击振荡作用具有重要影响,获取 PMGSPTFMMD_OP 气液分离过程中流体速度变化信息如图 13 所示。

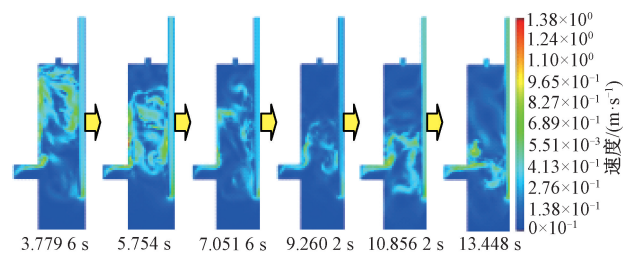


图 13 PMGSPTFMMD_OP 内速度变化云图
Fig. 13 Cloud map of velocity change within PMGSPTFMMD_OP

由图 13 可知,随着 PMGSPTFMMD_OP 内上部气相逐渐累积,PMGSPTFMMD_OP 内相扰动速度逐减小,而液流管内的相流速逐渐增大。在气-液界面处流体扰动显著,而在 PMGSPTFMMD_OP 气相累积区及液相沉降区相流速接近 0。因此,此种分布特性有利于 PMGSPTFMMD_OP 更好的进行气液分离及气相排出。

综上所述,PMGSPTFMMD_OP 具有较好的气液分离效果、较低的压力变化分布和较弱的相流速扰动,因此 PMGSPTFMMD_OP 可较好的完成多参数测量。

4 实验结果与分析

4.1 实验环境与数据采集

为了验证 PMGSPTFMMD_OP 的实际测量性能,在大庆石油测井试井检测实验中心进行了不同多相流工况下的实验研究,多相流实验平台如图 14 所示。

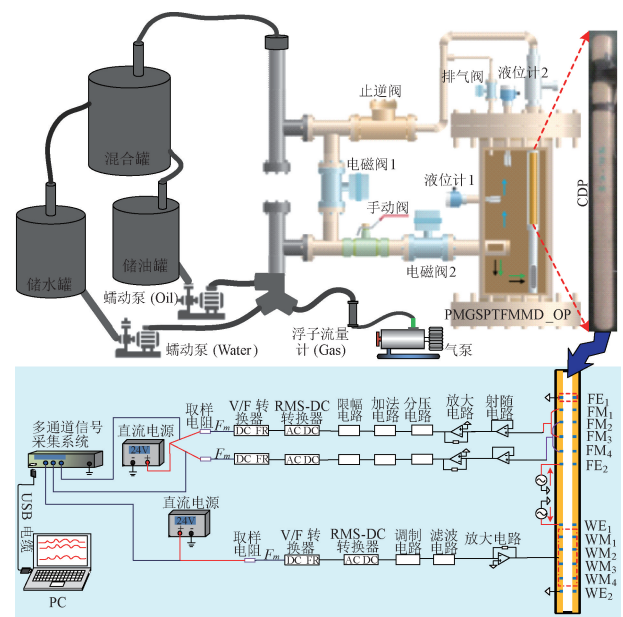


图 14 多相流实验平台示意图
Fig. 14 Diagram of multi-phase flow experimental platform

平台主要包括储水罐、储油罐、混合罐、气泵、浮子流量计、蠕动泵、输送管道和 PMGSPTFMMD_OP 等。实验流体采用工业柴油和水,实验气体为空气。气体由气泵供气,水、工业柴油分别储藏在储水罐和储油罐中。随着油气水混合流体流入 PMGSPTFMMD_OP 中,其中 CDP、液位计等输出随时间连续变化的波动信号。最后混合流体经由 PMGSPTFMMD_OP 流入混合罐中,经重力沉降进行油气水相分离,再使其循环使用。

PMGSPTFMMD_OP 外接 24 V 直流电源,而此装置核心检测部件由 CDP、激励源、信号处理电路以及其他部件组成。其中,核心检测部件 CDP 包括持水率传感器和流量传感器,两种传感器激励及信号处理电路主要由直流恒流源、放大滤波调制电路、RMS-DC 转换器、V/F 转换器、24 V 直流电源;射随电路、放大电路、分压电路、加法电路、限幅电路、RMS-DC 转换器、V/F 转换器等组成,CDP 与 PC 计算机系统相连。

测试时,多通道信号采集系统同步采集 CDP 信号,其采样频率为 16 kHz,采样时间设置为 10 s。

本文针对气、液相流量 5~70 m³/d、液相持水率 50%~90% 等多相流工况在多相实验平台基础上进行多相流持水率数据采集及处理结果如图 15 所示。

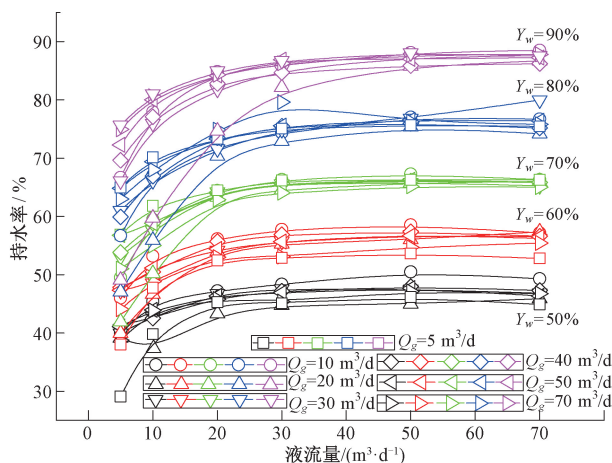


图 15 油气水多相流持水率测量结果

Fig. 15 The water holdup measurement result of multi-phase flow conditions

本文针对气、液相流量 5~70 m³/d、液相持水率 50%~90% 等多相流工况在多相实验平台基础上进行气量数据采集及处理结果如图 16 所示。

本文针对液相流量 5~70 m³/d、液相持水率 50%~90% 等多相流工况在多相实验平台基础上进行液流量数据采集及处理结果如图 17 所示。

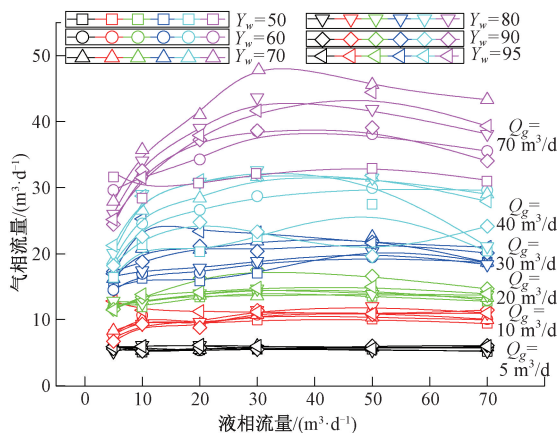


图 16 不同多相流工况下气相流量测量结果

Fig. 16 Gas flow rate measurement results under different multi-phase flow conditions

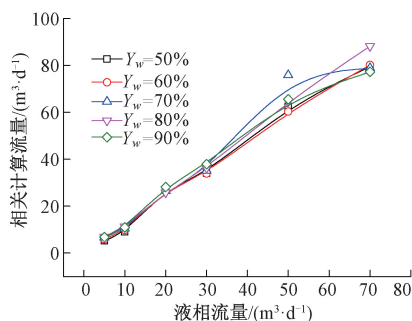


图 17 不同多相流工况下流量测量结果

Fig. 17 Liquid flow rate measurement results under different multi-phase flow conditions

4.2 实验结果分析

由图 15 可知,受排气周期的影响,当液流量<30 m³/d 时,随着液流量的增加,持水率测量结果逐渐增大且受气量影响较大;当液流量>30 m³/d 时,随着液流量的增加,持水率测量结果趋于平稳且受气量影响较小。就监测装置结构而言,参数 W_{md} 、 H_{md} 越大,其气液分离性能越好,持水率测量结果越准确且受液流量、气量等因素影响越小;参数 H_p 越低,其气液分离性能降低,持水率测量准确性越差。本文所选取的参数既考虑了装置的分离性能又考虑了其安全性和测量准确性,而且经过对测试数据的统计分析可知,PMGSPTFMMD_OP 持水率的测量精度优于 10%。因此,本文 2.2 节选取的各相关参数值是恰当的,也符合综合最优选取准则。

由图 16 可知,气量测量结果随着设定气量的增大而增大,当气量<30 m³/d 时,气量结果受流量和持水率变化影响小;当气量>30 m³/d 时,气量测量结果受流量和持水率变化影响大。就监测装置结构而言,参数 W_{md} 、 H_{md} 越大,其气液分离效果越好,气量测量结果越准确且

受液流量、持水影响越小;参数 H_p 越低,其气液分离效果越差,气量测量结果越差受液流量、持水影响越大。本文所选取的参数既考虑了装置的分离性能又考虑了其安全性和测量准确性,而且经过对测试数据的统计分析可知,气量测量误差小于 10%。因此,本文 2.2 节选取的各相关参数值是合理的,也符合综合最优选取准则。

由图 17 可知,PMGSPTFMMD_OP 流量测量结果与设定流量值之间呈现良好的线性关系,随着设定流量的增大而增大,流量测量结果不受液相持水率的影响。影响流量测量精度的是 $FM_{1,3} \sim FM_{2,4}$ 电极间距 L ,参数 L 越大,其信号相关性越差流量测量结果越差。本文所选取的参数 L 考虑了其测量准确性,而且经过对测试数据的统计分析可知,流量测量精度优于 4%。表明影响流量测量效果的 $FM_{1,3} \sim FM_{2,4}$ 电极间距 L 是依据最优准则选取的。

5 结 论

本文研制了一种永置式石油生产地面多井组单井轮流三相流多参数监测装置。并在大庆油田石油测井试井实验中心模拟井测试平台搭建的实验测量系统上开展了实验研究,结果表明,研制的 PMGSPTFMMD_OP 具有良好的多参数测量性能。该装置具备承担在计量站长期连续开展分时轮流测试单井三相流多参数的重要功能。另外,本文装置高性价比、接地气、无泄漏、长期耐久性的品质使其具有广泛的推广空间。可以承担和解决目前石油生产对单井产出液三相流多参数监测的迫切需要。

参考文献

- [1] SU Q, DENG X, LIU Z, et al. Phase fraction measurement of oil-gas-water three-phase flow with stratified gas by ultrasound technique[J]. Measurement Science and Technology, 2022, 33(7):075302.
- [2] HAO H, YAN P, HAO B, et al. Multiphase measurement of oil production using fiber-conductance dual-mode sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(13): 12796-12807.
- [3] JIA H, BAI Y, DANG R, et al. Experimental study on the choice of transducer resonance frequency in downhole flow measurement[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1894(1): 012057-012064.
- [4] 朱正平. 面向数字油田的云数据服务架构研究[D]. 荆州:长江大学, 2015.
ZHU ZH P. Study on Framework of cloud data service oriented digital oilfield [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2015.
- [5] 欧阳凯丽, 晁阳, 郭鹏, 等. 一种数字化油田井口流

体温度压力测量装置[P]. CN216077092U. 2022-03-18.

OUYANG K L, CHAO Y, GUO P, et al. A digital oilfield wellhead fluid temperature and pressure measurement device[P]. CN216077092U. 2022-03-18.

- [6] TUSS B, PERRY D, SHOUP G. Field tests of the high gas volume fraction multiphase meter[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1996.
- [7] ISMAIL I, GAMIO J C, BUKHARI S F A, et al. Tomography for multi-phase flow measurement in the oil industry[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2005, 16(2-3): 145-155.
- [8] GRIFFITH P. Multiphase flow in pipes[J]. Journal of Petroleum Technology, 2007, 36(3): 361-367.
- [9] BRILL J P. Multiphase flow in wells[J]. Journal of Petroleum Technology, 2007, 39(1): 15-21.
- [10] DOWTY E L, HATTON G J, DURRETT M G, et al. Design and performance of a three-phase subsea metering system [C]. International Meeting on Petroleum Engineering, 1992.
- [11] RASK M. DENMARK: M-commerce experiences and perspectives [M]. Hershey: Idea Group Publishing, 2006: 46-71.
- [12] 叶卫东, 仇亭亭. 重力式气液分离器结构优化及分离性能数值模拟[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(2): 133-136.
YE W D, QIU T T. Structure optimization of gas-liquid gravity separator and numerical simulation of its separation performance [J]. Machine Building & Automation, 2018, 47(2): 133-136.
- [13] OLALEYE O E, OMBELE V B, OLUSOLA A A, et al. CFD modeling analysis of a vertical gas liquid separator[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 216: 110733.
- [14] 勾丹. 油井井口三相计量技术的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2008.
GOU D. Research of three-phase measuring technology at the mouth of oil well [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology of China, 2008.
- [15] FAZAEI ZADEH M, MIRHAJ S A, BAHARI-MOGHADAM M, et al. Experimental study to find optimum pressure for separation of wellhead fluids[C]. SPE Production & Operations Conference & Exhibition, 2010: 422-430.
- [16] WANG G, YAN C Q, FAN G M, et al. Experimental study on a swirl-vane separator for gas-liquid separation[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2019, 151: 108-119.
- [17] ZHUGE X L, QI X D, WANG S Z, et al. Evaluation

- and improvement of the performance of a wellhead multistage bundle gas-liquid separator [J]. Processes, 2020(10): 1-12.
- [18] ANTONIO-LOPEZ J E, SANCHEZ-MONDRAGON J J, LIKAMWA P, et al. Fiber-optic sensor for liquid level measurement [J]. Optics Letters, 2011, 36 (17): 3425-3427.
- [19] WEI M, DENG Z, ZHENG J, et al. Magnetic float liquid level detection method for high-temperature superconducting flux-pinning maglev system [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2022, 32(4): 9000105.
- [20] 张峰, 杨文阳. 微电极材料极化特性研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(3): 187-196.
ZHANG F, YANG W Y. Study on polarization characteristics of micro-electrode materials [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(3): 187-196.
- [21] WANG D Y, JIN N D, ZHUANG L X, et al. Development of a rotating electric field conductance sensor for measurement of water holdup in vertical oil-gas-water flows [J]. Measurement Science & Technology, 2018, 29(7): 075301.
- [22] WANG D Y, JIN N D, ZHAI L S, et al. Measurement of oil-gas-water mixture velocity using a conductance cross-correlation flowmeter with center body in small pipe [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19: 4471-4479.
- [23] HAO H, KONG D M, CHEN X Y, et al. Multiphase holdup measurement of oil-gas-water flow using new dual receiver fiber-optical probe array multiphase logging tool [J]. The Review of Scientific Instruments, 2023, 94(2): 025006.
- [24] LIU X B, HU J H, XU W F, et al. A new cylindrical capacitance sensor for measurement of water cut in a low-production horizontal well [C]. Journal of Physics Conference, 2009, 147: 012002.
- [25] 陈基亮, 孔德明, 郝虎, 等. 石油生产光纤-电导组合探针阵列多分相测井研究 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 42(1): 239-252.
CHEN J L, KONG D M, HAO H, et al. Research on a fiber-conductance combined probe array multi-phase logging tool in petroleum productions [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 42(1): 239-252.
- [26] LI Y W, CHEN J L, KONG W H, et al. Design and optimization of the fiber-optic probe array for measuring gas holdup in oil-gas-water multiphase flow [J]. Journal

of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2018, DOI:10.1007/s12652-017-0674-2.

- [27] 郝虎, 孔德明, 陈晓玉, 等. 一种石油生产永置式地面井口持水率动态测量装置研究 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(12): 26-38.

HAO H, KONG D M, CHEN X Y, et al. Research on the permanent surface wellhead water holdup dynamic and static measuring device for oil production [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(12): 26-38.

作者简介



郝虎, 2016 年于邢台学院获得学士学位, 2019 年于燕山大学获得硕士学位, 现为燕山大学博士研究生, 主要研究方向为智能控制与智能信息处理技术。

E-mail: haohu@stumail.ysu.edu.cn

Hao Hu received his B.Sc. degree from Xingtai University in 2016, and M.Sc. degree from Yanshan University in 2019. He is currently a Ph.D. candidate at Yanshan University. His main research interests include intelligent control and intelligent information processing technology.



陈晓玉 (通信作者), 2007 年于燕山大学获得学士学位, 2010 年于燕山大学获得硕士学位, 2014 年于燕山大学获得博士学位, 现为燕山大学副教授, 主要研究方向为智能信息处理技术。

E-mail: chenxiaoyu@ysu.edu.cn

Chen Xiaoyu (Corresponding author) received her B.Sc. degree from Yanshan University in 2007, M.Sc. degree from Yanshan University in 2010, and Ph.D. degree from Yanshan University in 2014. She is currently an associate professor at Yanshan University. Her main research interest includes intelligent information processing technology.



孔德瀚, 2009 年于大连理工大学获得学士学位, 2012 年于燕山大学获得硕士学位, 2017 年于燕山大学获得博士学位, 现为河北环境工程学院讲师, 主要研究方向为智能信息处理。

E-mail: kdh0312@163.com

Kong Dehan received his B.Sc. degree from Dalian University of Technology in 2009, M.Sc. degree from Yanshan University in 2012, and Ph.D. degree from Yanshan University in 2017. He is currently a lecturer at Hebei Institute of Environmental Engineering. His main research interest includes intelligent information processing technology.